

Представленные в работе результаты демонстрируют тропосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, которые могут быть использованы для кратковременных прогнозов крупных землетрясений совместно с известными предвестниками сейсмической опасности. Эти результаты показывают также возможность визуализации акустических гравитационных волн и внутренних гравитационных волн в тропосфере с использованием данных зондирования атмосферы с космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1984.
2. Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ЗВХ ВСНЦ СО РАН, 2006.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М. : Мир, 1978.
4. Кашкин В. Б., Симонов К. С. Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Инженерная экология. 2011. № 2 (98). С. 38–54.
5. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М. : Логос, 2001.
6. Technical Documentation Introduction Page [Electronic resource]. URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>.
7. Персональные станции приема, хранения и обработки изображений Земли из космоса – основная продукция Инженерно-технологического центра СканЭкс [Электронный ресурс]. URL: <http://scanex.ru/ru/stations>.
8. Index of /opsats/polar/iapp [Electronic resource]. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>.

9. READY Current & Forecast Meteorology. Forecast Model Graphics [Electronic resource]. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmnet.html>.

10. The old maps and event pages have been replaced [Electronic resource] URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>.

11. Шулейкин В.В. Физика моря. М. : Наука, 1968.

12. News & Comment [Electronic resource]. URL: <http://www.nature.com/nature>.

References

1. Matveev L. T. Fizika atmosfery (Physics of the Atmosphere). Leningrad, Hidrometeoizdat, 1984. 752 p.
2. Afraimovich E. L., Perevalova N.P. GPS-monitoring verkhney atmosfery (GPS-Monitoring of the earth's Upper Atmosphere). Irkutsk, RAS Institute of Solar-Terrestrial Physics, 2006. 480 p.
3. Gossard E. E., Hooke W. H. Waves in the Atmosphere. Elsevier, Oxford-New York, 1975.
4. Kashkin V. B., Simonov K. S. Ingenernaya Ekologiya (Engineering Ecology), 2011, № 2, pp. 38–54.
5. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. Distantionnoye zondirovanie Zemly iz kosmosa. Cifrovaya obrabotka izobrazheniy (Remote sensing. Image Processing). Moscow, Logos, 2001. 264 p.
6. Available at: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>
7. Available at: <http://scanex.ru/ru/stations>
8. Available at: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>.
9. Available at: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmnet.html>
10. Available at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>
11. Shuleykin V. V. Fizika Morya (Sea Physics). Moscow, Nauka, 1968. 1090 p.
12. Available at: <http://www.nature.com/nature>.

© Григорьев А. С., Кашкин В. Б., 2013

УДК 551.501:537.874.34

ТРОПОСФЕРНАЯ ЗЕНИТНАЯ ЗАДЕРЖКА ПО ДАННЫМ GPS-СТАНЦИЙ ULAZ, IRKT И BADG*

Ю. Б. Башкуев¹, М. Г. Дембелов¹, А. В. Лухнев², В. А. Саньков²

¹Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128. E-mail: mdembelov@yandex.ru

На основе многолетних измерений радиосигналов на сети постоянно действующих GPS станций ULAZ, IRKT и BADG, разнесенных на расстояние до 230 км, получены оценки тропосферной зенитной задержки (ТЗЗ), определяемой при обработке первичных GPS данных с помощью программного пакета GAMIT. ТЗЗ отражает вариации различных атмосферных процессов. Проведен детальный анализ данных GPS станции ULAZ, полученных за период с 1999 по 2010 гг.

Ключевые слова: GPS, тропосферная зенитная задержка, атмосферные процессы.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ-Сибирь № 12-05-98051 и интеграционного проекта СО РАН № 11.

TROPOSPHERE ZENIT DELAY ACCORDING TO GPS DATA OF ULAZ, IRKT AND BADG STATIONS

Yu. B. Bashkuev¹, M. G. Dembelov¹, A. V. Loukhnev², V. A. Sankov²

¹Institute of Physical Materials Sciences of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia

²Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch Russian Academy of Sciences
12 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: mdembelov@yandex.ru

Estimations of the zenith troposphere delay (ZTD) detected at primary GPS data processing using GAMIT program are received on the base of multiyear measurements of radio signals on a net of regular GPS stations of ULAZ, IRKT and BADG spaced out up to 230 km. ZTD reflects variations of different atmosphere processes. The detailed analysis of GPS data of the ULAZ station for the period of 1999–2011 is presented.

Keywords: GPS, troposphere zenith delay, atmosphere processes.

Развитие радиофизических методов для глобального изучения радиоклимата и условий радиосвязи в атмосфере Земли с помощью высокостабильных сигналов спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и других) является актуальным направлением междисциплинарной темы «Фундаментальные проблемы естественных и искусственных электромагнитных полей Земли». Дистанционное зондирование с использованием GPS и ГЛОНАСС радиосигналов позволяет определить характеристики тропосферы [1]. Возникающие из-за тропосферной рефракции погрешности в РСА данных ограничивают возможности радарной интерферометрии при высокоточных определениях геофизических и геометрических параметров [2].

Цель работы – проанализировать данные GPS станций ULAZ, IRKT и BADG, полученные за период с 1999 по 2011 гг. и показать возможности исследования тропосферы с помощью системы наземных GPS – ГЛОНАСС приемников, разнесенных в пространстве [3]. Совместно с ИЗК СО РАН проведен анализ данных GPS приемника ULAZ в части определения ТЗЗ за 1999–2010 гг. ТЗЗ является одной из наиболее существенных поправок, которые учитываются при высокоточных геодезических расчетах по GPS данным. Определяемая с помощью программного пакета GAMIT ТЗЗ отражает вариации различных атмосферных процессов. ТЗЗ является суммой «сухой» или гидростатической (ТГЗ) и «влажной» (ТВЗ) составляющих. ТЗЗ изменяется примерно от 6 до 8 нс по времени (1,9–2,4 м или 10–12 фазовых циклов на частоте L1 = 1575,42 МГц) в зависимости от метеоусловий и местоположения. При уменьшении угла возвышения α тропосферная задержка увеличивается как косеканс α этого угла, поэтому задержка на частоте L1 с углом α в 20° может достигать от 30 до 36 циклов. Тропосферная задержка определяется коэффициентом преломления тропосферы $n = \sqrt{\epsilon} \approx 1 + (\epsilon - 1) / 2$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость воздуха. При этом восприимчивость $k_3 = (\epsilon - 1)$ смеси сухого воздуха и водяного пара подчиняется закону аддитивности, т. е. равна сумме восприимчивости отдельных газов смеси, пропорциональных их парциальным давлениям. Закону аддитивности соответствует и широко

используемый в радиометеорологии индекс рефракции [4]
$$N = (n - 1) \cdot 10^5 = \frac{77.6}{T} p + \frac{3.73 \cdot 10^6}{T^2} e = N_T + N_e,$$

где N_T – индекс рефракции для сухого воздуха, зависящий от изменений температуры и давления воздуха, N_e – индекс рефракции для водяного пара, T – абсолютная температура, К; p – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар (1 мбар = 10^2 Н/м). Формула для N дает возможность определить индекс рефракции (коэффициент преломления), если известны температура, давление и упругость водяного пара в пункте приема GPS сигналов (рис.1).

Для средних летних условий в г. Улан-Удэ $T = 290$ К; $p = 950$ мбар; $e = 12$ мбар. Для зимы $T = 253$ К; $p = 965$ мбар; $e = 1$ мбар. В районе г. Улан-Удэ в среднем у поверхности Земли $n = 1,000\,301\,4$ и $N = 301,4$. Из формулы для N следует, что ТЗЗ также является суммой «сухой» (ТГЗ) и «влажной» (ТВЗ) составляющих. Атмосферный водяной пар влияет на скорость распространения GPS сигналов. В целом «влажная» составляющая (ТВЗ) вносит значительно меньший вклад в ТЗЗ, особенно в зимний период. Ее вклад можно оценить отношением N_e / N_T , которое изменяется для г. Улан-Удэ от 0,02 зимой до 0,24 летом. Следовательно, «сухая» задержка ТГЗ составляет определяющую часть ТЗЗ, но исследование ТВЗ очень перспективно в климатологии. Временные ряды ТЗЗ и атмосферного давления на станции ULAZ за 2005–2010 гг. с устойчивым годовым ходом показаны на рис. 2.

Осенью, зимой и весной, когда сезонные параметры показателя преломления обладают значительной устойчивостью (особенно зимой), численные значения ТЗЗ имеют минимумы, примерно равные 2,2 м. Повышение давления зимой относительно лета составляет в среднем 20 мбар. При летнем уменьшении атмосферного давления всегда наблюдается увеличение ТЗЗ из-за относительно высокого влагосодержания воздуха. Летнее увеличение ТЗЗ связано с увеличением атмосферного водяного пара над пунктом GPS измерений, т. е. с увеличением ТВЗ. Однако в целом ТВЗ вносит значительно меньший вклад в ТЗЗ, особенно зимой. Если принять среднее значение ТГЗ равным 2,2 м, то добавка за счет ТВЗ в летнее время

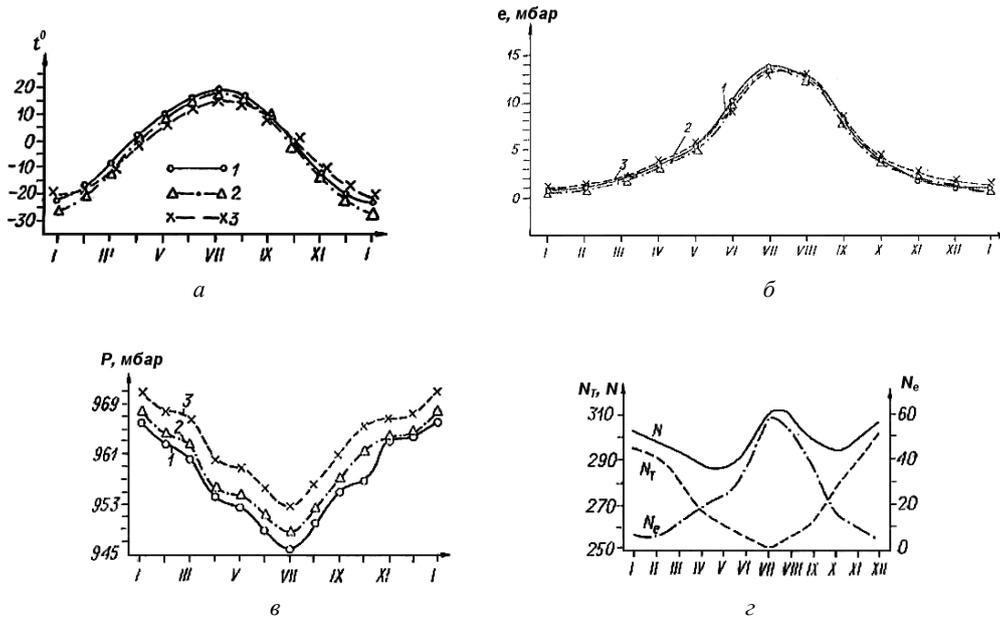


Рис. 1. Годовой ход:
 а – температуры; б – влажности; в – атмосферного давления по данным станций
 Гидрометслужбы Республики Бурятия (1 – ст. Улан-Удэ; 2 – ст. Баргузин;
 3 – ст. Усть-Баргузин); з – N_T и N_e по месяцам для г. Улан-Удэ

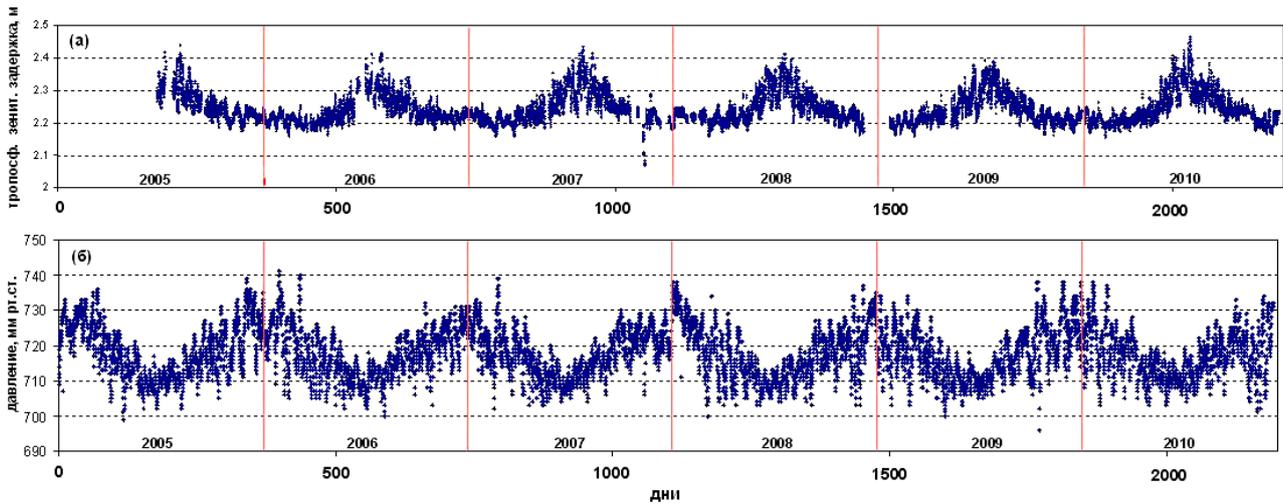


Рис. 2. Временные ряды тропосферной зенитной задержки (а) и приземного атмосферного давления (б) на станции ULAZ за 2005–2010 гг.

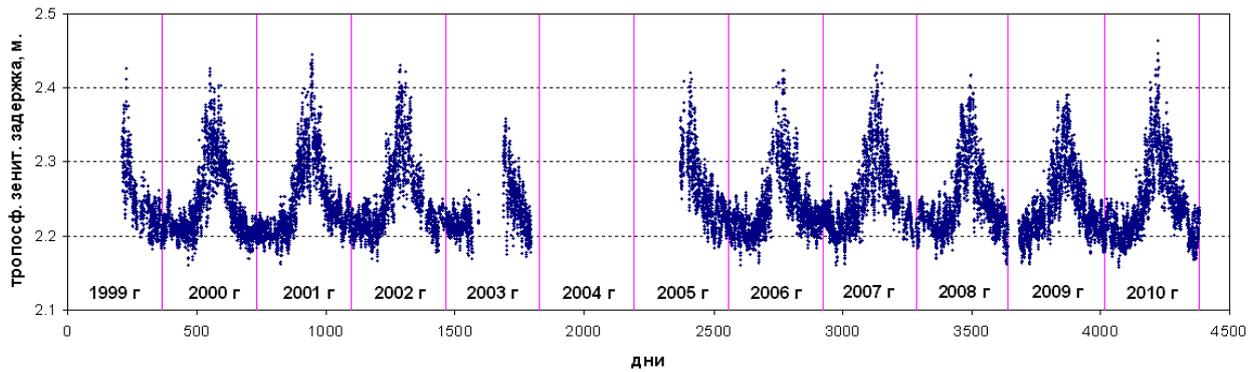


Рис. 3. Годовой ход Т33 GPS станции ULAZ за 1999–2010 гг.

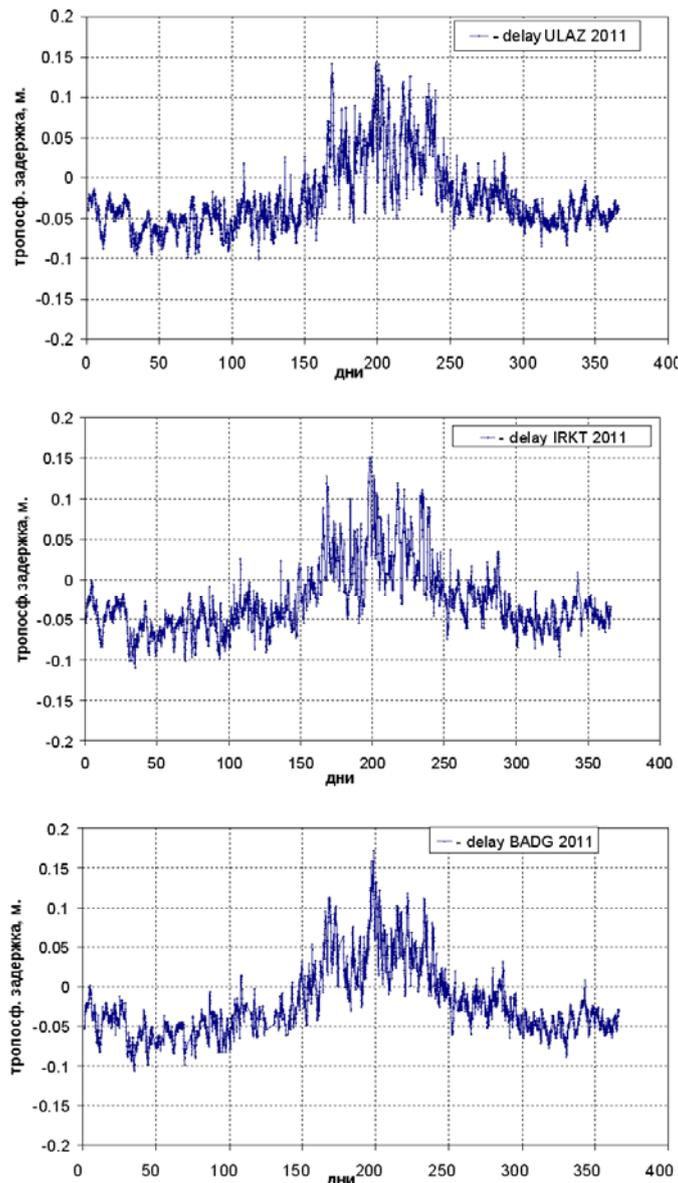


Рис. 4. Сравнение годового хода ТВЗ для GPS станций ULAZ, IRKT и BADG за 2011 г.

составит 0,2–0,27 м, т. е. не превышает (8–12) % от ТГЗ. Ряд ТЗЗ с июля 1999 г. по декабрь 2010 г. приведен на рис. 3. Сравнение ТВЗ для GPS станций ULAZ, IRKT и BADG за 2011 г. представлено на рис. 4. Отчетливо видна высокая степень корреляции ТВЗ между тремя станциями, разнесенными в пространстве до 230 км.

Таким образом, для GPS станции ULAZ на 11-летнем интервале времени определена ТЗЗ, которая изменялась в пределах 2,1–2,47 м. «Влажная» (ТВЗ) составляющая достигает 0,27 м и определяется содержанием водяного пара в тропосфере. Многолетний ход ТВЗ характеризует климатические явления в регионе. Полученные результаты позволяют построить региональную пространственно-временную модель ТЗЗ и определить вариации трехмерных полей содержания водяного пара с помощью сетей наземных GPS приемников [3].

Библиографические ссылки

1. Калинин В. В., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 705–713.
2. Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS / S. Cheng, D. Perissin, H. Lin, F. Chen // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. Vol. 86. P. 71–82.
3. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович [и др.] ; под ред. Г. А. Жеребцова. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
4. Цыдыпов Ч. Ц. Распространение ультракоротких радиоволн в гористой местности. Новосибирск : Наука, 1977.

References

1. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Teptin G. M. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2012. Vol. 48, no. 6, p. 705–713.
2. Cheng S., Perissin D., Lin H., Chen F. Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, vol. 86, pp.71–82.
3. Afraimovich E. L. [and oth.] Seismoionosfernye i seismoelektromagnitnye processy v Baikal'skoy riftovoy

zone (Seismoionosfernye seismoelektromagnitnye and processes in the Baikal Rift Zone). Edited by G. A. Zherebtsov. Russ. Acad. of Sciences, Siberian Div., Inst. of Solar-Terr. Physics. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2012. 304 p.

4. Tsydypov Ch. Ts. Rasprostraneniye ultrakorotkih radiovoln v goristoy mestnosti (Distribution of ultrashort radio waves in the mountainous terrain). Novosibirsk, Nauka, 1977, 208 p.

© Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г.,
Лухнев А. В., Саньков В. А., 2013

УДК 537; 629.784; 533.95

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ПЛАЗМА-ПРОГРЕСС» И «РАДАР-ПРОГРЕСС»*

В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев, Д. С. Кушнарев, С. С. Алсаткин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

Проведены активные космические эксперименты по исследованию возмущений в ионосфере, генерируемые выхлопными газами двигателей космических аппаратов. Основные результаты, полученные методом некогерентного рассеяния, показали, что небольшие массы выхлопных газов вызывают снижение электронной концентрации до 40 % в областях с размерами десятки километров и временами существования до 20 минут.

Ключевые слова: ионосфера, электронной концентрация, активные космические эксперименты, космические аппараты, Иркутский радар некогерентного рассеяния

SOME RESULTS OF "PLASMA-PROGRESS" AND "RADAR-PROGRESS" ACTIVE SPACE EXPERIMENTS

V. V. Khakhinov, A. P. Potekhin, V. P. Lebedev, D. S. Kushnarev, S. S. Alsatkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Russian Academy of Sciences Siberian branch
126a Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

We carried out active space experiments for studying ionospheric disturbances generated by spacecraft engine exhaust. Incoherent scatter results showed that the small mass of the exhaust gases causes a decrease in the electron density up to 40 % with tens of kilometers in sizes and with up to 20 minutes in lifecycle.

Keywords: ionosphere, electron density, active space experiments, spacecraft, Irkutsk incoherent scatter radar.

Начиная с 2007 г. ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» и Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) проводят активные космические эксперименты (КЭ) «Радар-Прогресс» (до 2010 г. «Плазма-Прогресс») по исследованию пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений, генерируемые высокоскоростной выхлопной струей жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) транспортного грузового корабля (ТГК) серии «Прогресс». ТГК привлекаются к участию в КЭ в режиме автономного полета на высоте ~350–400 км

после отстыковки от международной космической станции. Используется наземный комплекс оптико-электронных и радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН. Основным исследовательским инструментом является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [1].

Сеансы КЭ проводятся во время нахождения ТГК «Прогресс» в основном лепестке диаграммы направленности (ДН) ИРНР при определенном сочетании известных условий, таких как: гелио-геофизические обстановка, тип ЖРД, координаты ТГК, положение Солнца, направление скорости выхлопной струи ЖРД. К настоящему времени выполнено 12 сессий, в течение которых проведено 63 сеанса.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388 и 8699) и РФФИ (гранты № 13-05-00456-а и 13-0200957-а).